

На правах рукописи

Сидорова Вера Тагировна

ФОТОННОЕ ЭХО В УСЛОВИЯХ
МНОГОИМПУЛЬСНОГО ЦИКЛИЧЕСКОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ
И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ СОЗДАНИЯ
ФУНКЦИОНАЛЬНОГО ОПТИЧЕСКОГО ЭХО-ПРОЦЕССОРА

Специальность: 01.04.05 – Оптика

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

КАЗАНЬ - 2010

Работа выполнена на кафедре электромеханики ГОУ ВПО «Марийский
государственный университет»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор
Иван Иванович Попов

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор
Сергей Владимирович Сазонов

доктор физико-математических наук, в.н.с.
Владимир Александрович Зуйков

Ведущая организация: ГОУ ВПО «Казанский государственный
технический университет им. А.Н. Туполева»

Защита состоится «23» декабря 2010 г. в 14 час. 30 мин.
на заседании диссертационного совета Д 212.081.07 при
ФГАОУВПО «Казанский (Приволжский) федеральный университет»
по адресу: 420008, г. Казань, ул. Кремлевская, 16, физический факультет.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке
им. Н.И. Лобачевского Казанского (Приволжского)
федерального университета

Автореферат разослан « » _____ 2010 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физико-математических наук

Камалова Дина Илевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Тема диссертации посвящена проблеме исследования влияния дискретных оптических сигналов на процесс формирования фотонного эха (ФЭ).

Исследовались свойства многоимпульсного фотонного эха, возбуждаемого последовательностью оптических импульсов, равных по длительности и амплитуде, разделенных произвольными дискретными значениями временных интервалов. При этом возбуждающие импульсы подавались в двух направлениях. Результаты работы предназначены для формирования фундаментальных основ построения новейших оптических средств вычислительной техники и выработки подходов для разработки конкурентоспособных информационных технологий. В силу своей актуальности, выполненные теоретические исследования относятся к приоритетным направлениям современной российской науки.

Современное состояние исследований по оптической обработке информации отражает большие возможности по созданию быстродействующих оптических процессоров, работающих как с цифровой, так и с аналоговой информацией, в определенных случаях по эффективности превышающих электронные процессоры. Значительно развиты исследования по разработке оптических эхо-процессоров. Существует ряд работ, демонстрирующих обработку аналоговых сигналов, представленных амплитудно-временной формой [1-4] или волновым фронтом [5-9] оптического излучения, поступающего на вход процессора. Также известны работы по обработке на оптическом эхо-процессоре цифровой информации. Логические «0» и «1» представлены двумя фиксированными значениями параметров оптических импульсов (амплитуды, направления вектора поляризации, волнового фронта [10-19]. Каждое цифровое значение записывается на соответствующем участке однородной ширины спектральной линии [10] или на определенном временном интервале кодового сигнала [11]. В работе [20, 21] исследованы процессы преобразования классической информации, заложенной в объектный лазерный импульс (представленный последовательностью n импульсов), в потенциальную (структурную) квантовую информацию резонансной среды при записи оптической эхо-голограммы.

Значительная часть исследований по фотонному эхо посвящена выбору и исследованию резонансных сред для оптических эхо-процессоров. Большинство работ по оптической обработке информации посвящено экспериментам, выполненным в твердом теле в наносекундном диапазоне длительностей оптических сигналов. Их недостаток заключается в том, что все они выполнены при низких (гелиевых) температурах. Этому недостатка лишены эксперименты по фотонному эхо, выполненные в парах молекулярного йода. Они проводились при комнатной температуре как в наносекундном [22], так и пикосекундном диапазонах длительностей возбуждающих импульсов [23].

Достоинством оптических эхо-процессоров по сравнению с электронно-цифровыми процессорами является не только высокое быстродействие и большая информационная емкость, но и возможность реализации принципа работы процессора за счет эволюции резонансной среды при возбуждении сигналов фотонного эха, сопровождающейся физической реализацией решения определенных математических функций, например, проводимых с кватернионными величинами [24]. При этом надлежащая фиксация параметров регистрируемых сигналов ФЭ приводит к получению результатов вычислений.

Несмотря на многообразие предложений по созданию оптических эхо-процессоров, на сегодня не известно процессоров, выполняющих обработку информации, представленную дискретными сигналами, которая может оказаться перспективной при решении сложных математических задач, сопровождающем эволюцию резонансной среды при возбуждении сигналов фотонного эха. С точки зрения функциональной оптической обработки информации с применением дискретных сигналов использование фотонного эха является наиболее перспективным. Это связано с тем, что существует зависимость параметров сигналов фотонного эха от ряда дискретных значений параметров возбуждающего оптического излучения (направление линейной поляризации, временной интервал между возбуждающими импульсами, направление волновых векторов возбуждающих импульсов и др.). При возбуждении эхо-сигналов последовательностью оптических импульсов с различными значениями ее дискретных параметров в резонансной среде формируется множество сигналов фотонного эха (ФЭ), отражающих соответствие комбинации параметров эхо-сигналов определенным комбинациям значений параметров возбуждающего излучения.

Вместе с тем, несмотря на развитие современной вычислительной математики и вычислительной техники, одной из нерешенных проблем является эффективное решение NP -полных задач. К NP -полным задачам относится значительное число задач комбинаторики и дискретного анализа [25]. Для таких задач не найдены алгоритмы получения точных решений при высоком быстродействии, поскольку в случае применения современных цифровых вычислительных средств время, требуемое для решения данных задач без применения приближенных методов, экспоненциально растет с увеличением числа неизвестных и заданных параметров. Потому построение теоретических основ разработки методов оптической обработки информации, с помощью которых можно было бы решать такие задачи, является актуальной задачей оптической науки.

Поэтому тема диссертационного исследования, посвященная разработке теоретических основ для создания функционального процессора, использующего новые методы оптической дискретной обработки информации на основе вновь выявленных закономерностей многоимпульсного режима возбуждения и регистрации сигналов фотонного эха и новых его свойств, на ко-

тором будет возможно эффективное решение одной из NP -полных задач, «задачи о рюкзаке», соответствует приоритетным направлениям развития науки и техники и потому, безусловно, является **актуальной**.

Цель работы - теоретическое исследование явления фотонного эха в условиях многоимпульсного циклического возбуждения, направленное на получение новых свойств, перспективных для разработки функционального оптического эхо-процессора.

Основные задачи:

- 1) Исследование особенностей формирования сигналов ФЭ при их возбуждении многоимпульсной последовательностью.
- 2) Получение новых свойств сигналов ФЭ, перспективных для разработки функционального оптического эхо-процессора.
- 3) Разработка нового метода оптической дискретной обработки информации на основе полученных результатов.
- 4) Исследование комбинаторных свойств фотонного эха в зависимости от предельных параметров возбуждающей последовательности и условий возбуждения.

Объект исследования - явление фотонного эха, возбуждаемого в многоимпульсных режимах, лежащее в основе поставленной проблемы выявления новых свойств сигналов многоимпульсного ФЭ, обеспечивающих достижение намеченной цели. Исследовались параметры возбуждения и регистрации, поляризационные свойства сигналов ФЭ в условиях их многоимпульсного возбуждения.

Научная новизна. Впервые установлены комбинаторные свойства циклически возбуждаемого многоимпульсного фотонного эха, показывающие, что заданной последовательности произвольных временных интервалов, отделяющих импульсы возбуждающей последовательности, соответствует вполне определенная комбинация направлений распространения эхо-сигналов, выбираемых определенным образом в каждом акте возбуждения ФЭ.

Показана возможность одновременной независимой регистрации комбинаторных свойств фотонного эха, циклически возбуждаемого двумя дискретными оптическими сигналами, подаваемыми в одном луче по двум ортогональным направлениям линейной поляризации, являющимися поляризационными каналами оптической обработки информации. Для распознавания помех от информации другого канала в каждом из каналов использована своя амплитудно-временная форма возбуждающих импульсов.

Показано, что эволюция резонансной среды при циклическом многоимпульсном возбуждении сигналов фотонного эха сопровождается физической реализацией решения троичной «задачи о рюкзаке», при этом надлежащая

фиксация параметров регистрируемых сигналов ФЭ приводит к получению результатов ее вычислений.

Получены аналитические выражения для определения максимально допустимых временных интервалов между возбуждающими импульсами и для оценки максимального числа импульсов в возбуждающей последовательности, при которых возможна регистрация многоимпульсного фотонного эха.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Предложенная методика циклического возбуждения и регистрации многоимпульсного фотонного эха позволяет определять последовательность направлений распространения эхо-сигналов, выбираемых определенным образом в каждом акте возбуждения, по заданной последовательности произвольных временных интервалов, отделяющих импульсы возбуждающей последовательности.
2. Комбинаторные свойства циклически возбуждаемого многоимпульсного фотонного эха независимо проявляются при его одновременном возбуждении двумя дискретными оптическими сигналами, подаваемыми в одном луче по двум ортогональным направлениям линейной поляризации.
3. Представление параметров «задачи о рюкзаке» в значениях параметров режима циклического возбуждения многоимпульсного фотонного эха позволяет найти точное решение этой задачи по параметрам эхо-сигналов.
4. Полученные аналитические выражения, учитывающие граничные условия возбуждения и регистрации многоимпульсного фотонного эха, позволяют найти максимально допустимые временные интервалы между возбуждающими импульсами и максимально возможное число импульсов в возбуждающей последовательности.

Научная и практическая значимость.

1. Комбинаторные свойства циклически возбуждаемого многоимпульсного фотонного эха могут быть применены для оптической обработки информации.
2. Использование двух направлений линейной поляризации для циклического возбуждения многоимпульсного фотонного эха позволяет уплотнять информацию при ее оптической обработке на основе комбинаторных свойств фотонного эха.
3. Метод оптической дискретной обработки информации на основе комбинаторных свойств многоимпульсного фотонного эха может быть применен при построении функционального оптического эхо-процессора для решения специальных задач дискретной математики.
4. Полученные аналитические выражения позволяют определить оптимальные параметры оптического эхо-процессора (характеристики резонансной среды и условия формирования эхо-сигналов) для эффективной оп-

тической дискретной обработки информации на основе комбинаторных свойств ФЭ.

Методы исследования. Методологическую основу исследований составляет комплекс теоретических и экспериментальных знаний о явлении ФЭ, формируемого в газовых и твердотельных средах, опубликованных в общепризнанных научных монографиях и журналах. В процессе исследований использовались известные методы расчета параметров эхо-сигналов, как в газе, так и в твердом теле, при его многоимпульсном возбуждении. Применялось компьютерное моделирование процессов формирования эхо-сигналов с целью выявления исследуемых зависимостей параметров ФЭ от условий его многоимпульсного возбуждения.

Достоверность. Достоверность полученных результатов определяется точностью использованных общеизвестных методик при теоретических выводах и численных расчетах. Результаты полученных исследований хорошо согласуются с полученными ранее в частных случаях теоретическими и экспериментальными результатами.

Апробация работы. Результаты диссертации докладывались на IX, X и XI, XIV Всероссийских молодежных научных школах «Когерентная оптика и оптическая спектроскопия» (Казань, 2006, 2007, 2008, 2010), на X Международных Чтениях по квантовой оптике «IRQO'07» (Самара – 2007), на IX, X Международных школах «Волны – 2007», «Волны – 2008», на XI Всероссийской школе-семинаре «Физика и применение микроволн» (Москва, 2007, 2008, 2009), на II, и III Международных научных школах «Наука и инновации – 2007», «Наука и инновации – 2008», «Наука и инновации – 2010»: (Йошкар-Ола, 2007, 2008, 2010), на «Научной сессии МИФИ-2009», секция Фотоника и информационная оптика (Москва, 2009).

Диссертационные исследования поддержаны Российским фондом фундаментальных исследований в виде гранта № 06-02-16416-а (2006-2008 гг.).

Личный вклад автора. В большинстве совместных работ автором диссертации выполнена основная часть исследований. Соавторы этих работ помогали с консультациями по теме, участвовали в обсуждении результатов и написании работ.

Публикации. Основное содержание диссертации опубликовано в 14 научных публикациях, в том числе в 13 научных статьях, среди которых имеются 3 статьи в рекомендованных ВАК научных журналах, 3 статьи - в зарубежных журналах.

Структура и объем работы. Диссертационная работа объемом 123 страницы состоит из введения, четырех глав, заключения и списка использованной литературы. Работа содержит 14 рисунков. Список литературы включает 76 наименований. В конце каждой главы даются краткие выводы по изложенным в ней результатам.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во Введении освещено современное состояние исследований по теме диссертации и обоснована ее актуальность, сформулированы цель работы и основные положения, выносимые на защиту, отмечена научная новизна и практическая значимость полученных результатов, кратко изложено содержание диссертации.

В первой главе изложены основные закономерности и особенности формирования сигналов фотонного эха, как в резонансной газовой среде, так и в твердом теле, приведены методы их теоретического описания. Особое внимание уделено режиму многоимпульсного возбуждения сигналов фотонного эха (ФЭ). Проведен обзор современного состояния исследований по оптической обработке информации на основе фотонного эха. Оптическая обработка информации реализуется в оптических эхо-процессорах, использующих для этого в основном сигналы стимулированного фотонного эха (СФЭ) или их многоимпульсные аналоги. В действующих оптических эхо-процессорах решаются технически важные операции сжатия информационных сигналов, различные варианты их сверток и преобразования Фурье. Весьма перспективны разработки голографических эхо-процессоров. В работе [11] Т. Мосбергом с коллегами была продемонстрирована рекордная информационная плотность, достигающая 8 Гбит/дюйм². Более того, в работе [26] предполагается, что информационную плотность можно увеличить еще на два порядка за счет протяжки импульсов не только по частоте, но и по координате. В работе [27] показана возможность многоканальной записи информации (каналами здесь являются направления распространения возбуждающих импульсов и эхо-сигналов) и ее выборка с помощью поляризационных и амплитудно-временных свойств сигналов ФЭ. В экспериментах [28] для измерения времен необратимой продольной релаксации T_1 использовалась методика обращенного фотонного эха, при которой второй возбуждающий импульс был представлен последовательностью, состоящей из импульсов длительностью 0,1 нс, отделенных временными интервалами 0,1 нс. Продолжительность импульсной последовательности составляла порядка 100 нс. При этом от каждого импульса последовательности формировался свой сигнал обращенного эха. В целом в режиме обращенного эха формировалась последовательность из 500 эхо-сигналов длительностью 0,1 нс, отделенных временными интервалами 0,1 нс. Из приведенного обзора можно сделать вывод, что на сегодняшний день не разработано методов оптической дискретной обработки информации (имеющей минимальный шаг из-

менения входного сигнала), с помощью которых можно было бы решать специальные задачи дискретной математики. При использовании многоимпульсного фотонного эха для оптической обработки информации размерность обрабатываемой информации можно увеличить за счет увеличения числа эхо-сигналов. Поскольку одной из особенностей специальных задач дискретной математики является большое число параметров, объектом данных исследований было выбрано фотонное эхо при многоимпульсном его возбуждении. Также в данной диссертационной работе исследуется явление фотонного эха, возбуждаемого в парах молекулярного йода, так как одним из достоинств паров молекулярного йода перед остальными резонансными средами, является возможность наблюдения оптических процессов при комнатных температурах.

Во второй главе на основе анализа экспериментальных результатов многоимпульсного возбуждения сигналов ФЭ в парах молекулярного йода [29] последовательностью возбуждающих импульсов, отделенных произвольными временными интервалами, показана возможность регистрации всех сигналов ФЭ. В результате исследования пространственно-временных закономерностей формирования эхо-сигналов для многоимпульсного режима их возбуждения [30] предложена методика циклического возбуждения и регистрации многоимпульсного фотонного эха, позволяющая определять последовательность направлений распространения эхо-сигналов, выбираемых определенным образом в каждом акте возбуждения, по заданной последовательности произвольных временных интервалов, отделяющих импульсы возбуждающей последовательности. В данной работе рассматривается взаимодействие световых импульсов с двухуровневой резонансной средой, под которой понимается система одинаковых двухуровневых атомов, распределенных в некотором объеме [30]. При многоимпульсном возбуждении последовательностью n равных по длительности и амплитуде лазерных импульсов, отделяемых произвольными временными интервалами $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_{n-1}$ (отвечающими условию $\tau_m \ll T_1, T_2$ для данной резонансной среды), известны выражения для времени генерации эхо-сигнала и направления его распространения [30], справедливые для твердого тела:

$$t = t_n - \sum_{m=1}^{n-1} \tau_m \gamma_m, \quad (1)$$

$$\vec{k}_0 = \sum_{m=1}^n (\gamma_m - \gamma_{m-1}) \vec{k}_m, \quad (2)$$

где величины γ_m соответствуют горизонтальным участкам диаграммы в графическом методе расчета параметров эхо-сигналов [31] согласно правилу:

$$\begin{cases} \rho_+ \rightarrow \gamma = +1, \\ \rho_- \rightarrow \gamma = -1, \\ \rho_3 \rightarrow \gamma = 0, \end{cases} \quad (3)$$

а \vec{k}_m - волновые вектора возбуждающих импульсов. При этом рассматриваются сигналы фотонного эха, формирующиеся только после последнего возбуждающего импульса. Если при таком возбуждении эхо-сигналов первый возбуждающий импульс будет иметь направление вектора распространения \vec{k}_1 , а остальные возбуждающие импульсы будут направлены под острым углом к нему и иметь направление вектора распространения - \vec{k}_2 , то (2) переписется следующим образом:

$$\vec{k}_0 = \gamma_1 \vec{k}_1 + (1 - \gamma_1) \vec{k}_2, \quad (4)$$

то есть направление распространения эхо-сигналов будет зависеть только от γ_1 . Особенности экспериментальной реализации возбуждения фотонного эха при остром угле между волновыми векторами возбуждающих импульсов приведены в работе [31]. Поскольку γ_1 может принимать одно из трех значений 1, 0 или -1, из (4) следует, что отклики среды будут наблюдаться только в трех направлениях $\vec{k}_0 = \vec{k}_1$, при $\gamma_1 = 1$; $\vec{k}_0 = \vec{k}_2$, при $\gamma_1 = 0$; $\vec{k}_0 = 2\vec{k}_2 - \vec{k}_1$, при $\gamma_1 = -1$. В первом направлении распространялись сигналы восстановленного фотонного эха (ВФЭ), формируемые под воздействием трех возбуждающих импульсов, имеющих различные волновые вектора. Во втором направлении распространялись сигналы восстановленного фотонного эха (ВФЭ), первичного фотонного эха (ПФЭ) и СФЭ, формируемые параллельными пучками возбуждающего излучения. ВФЭ формировалось под воздействием ПФЭ и после него идущего возбуждающего импульса. Сигналы ПФЭ и СФЭ, регистрировавшиеся в третьем направлении, возбуждались парой импульсов, распространяющихся под острым углом (ПФЭ) и третьим импульсом, распространяющимся в направлении второго (СФЭ). Следовательно, каждому из трех возможных направлений распространения эхо-сигналов соответствует определенное значение γ_1 . Предположим, что в одном из направлений распространения эхо-сигналов в какое-то время зарегистрирован сигнал ФЭ. Тогда данному отклику соответствует значение γ_1 , удовлетворяющее (1) и (4). Для определения второй неизвестной набора $\gamma_m \in \{-1, 0, 1\}$, $m = 1, \dots, n-1$, повторим такой же акт возбуждения и регистрации серии эхо-сигналов, при этом уменьшив число возбуждающих импульсов на один первый импульс. В соответствии с

(1) время регистрации эхо-сигналов для данного акта должно уменьшиться на соответствующую для первого акта величину $\tau_1\gamma_1$, т.е. (1) примет вид:

$$t' = t_n' - (b - \tau_1\gamma_1), \quad (5)$$

где $b = t_n - t$ – временной интервал между последним возбуждающим импульсом и произвольно выбранным в первом акте времени регистрации эхо-сигналов. Тогда, регистрируя в заданное согласно (5) время эхо-сигнал в каком-либо из трех направлений распространения, мы определим γ_1 для второго акта возбуждения и регистрации эхо-сигналов. После повторения таких актов возбуждения и регистрации эхо-сигналов, в каждом из которых последовательность возбуждающих импульсов монотонно убывает на один первый импульс, можно определить набор значений γ_1 для каждого акта. При этом в каждом акте направление распространения всех возбуждающих импульсов, кроме первого, должно равняться \vec{k}_2 , а волновой вектор первого возбуждающего импульса \vec{k}_1 должен составлять острый угол по отношению к вектору \vec{k}_2 . Тогда нетрудно доказать, что последовательность значений γ_1 для каждого акта будет искомой последовательностью значений $\gamma_m \in \{-1, 0, 1\}$, $m = 1, \dots, n-1$, удовлетворяющей условиям (1) и (2).

Таким образом, суть методики циклического возбуждения и регистрации многоимпульсного фотонного эха заключается в следующем. При циклическом возбуждении и регистрации многоимпульсного фотонного эха по заданной последовательности произвольных временных интервалов, отделяющих импульсы возбуждающей последовательности, определяется последовательность направлений распространения эхо-сигналов, регистрируемых в заданное время в каждом акте возбуждения. Под циклическим возбуждением и регистрацией многоимпульсного фотонного эха здесь понимается циклически повторяющиеся описанные выше акты возбуждения и регистрации серии эхо-сигналов последовательностью импульсов, монотонно убывающей на один первый импульс в каждом последующем акте возбуждения эхо-сигналов. Такие акты возбуждения и регистрации сигналов ФЭ повторяются $n-2$ раза, т.е. до определения γ_{n-2} . Последняя неизвестная γ_{n-1} вычисляется с помощью выражения для временной закономерности распространения эхо-сигналов (1). При этом циклически повторять акты возбуждения и регистрации сигналов фотонного эха необходимо через время, превышающее время необратимой продольной релаксации резонансной среды T_1 , чтобы не регистрировать эхо-отклики, формируемые от предыдущего акта. В случае регистрации эхо-сигналов в заданное время по нескольким направлениям, необходимо произвольно (или по заданному приоритету) выбрать любое значе-

ние переменной γ_1 за регистрируемое в данном акте. После определения всего набора $\gamma_m \in \{-1, 0, 1\}$, $m = 1, \dots, n-1$, можно определить остальные возможные наборы значений данной последовательности.

Такое вполне определенное соответствие последовательности произвольных временных интервалов, отделяющих импульсы возбуждающей последовательности, последовательности направлений распространения эхо-сигналов, регистрируемых определенным образом в каждом акте возбуждения ФЭ, называется комбинаторными свойствами циклически возбуждаемого многоимпульсного фотонного эха.

Аналогично работе [29] получено выражение для временного

$$\tilde{t}n_0 = t_n \tilde{n}_n - \sum_{m=1}^{n-1} \tau_m \gamma_m \tilde{n}_m \quad (6)$$

и пространственного

$$\vec{n}_0 = \gamma_1 \vec{n}_1 + (1 - \gamma_1) \vec{n}_2 \quad (7)$$

синхронизмов для газовых сред, где $\vec{n} = \vec{k} / k$ – единичный вектор, указывающий направление распространения данного импульса или эхо-сигнала. В формуле (6) во всех слагаемых стоят произведения времени на единичные вектора, указывающие направления распространения возбуждающих импульсов и эхо-сигналов. Поскольку направления распространения возбуждающих импульсов нам известны, после приведения данного выражения к скалярному виду получим выражение для временного синхронизма, аналогичное выражению временного синхронизма для твердого тела (1). Тогда, переобозначив произведения скалярной величины единичного вектора \vec{n} на временной интервал, выражение (6) примет следующий вид:

$$\tilde{t} = \tilde{t}_n - \sum_{m=1}^{n-1} \tilde{\tau}_m \gamma_m, \quad (8)$$

где приняты обозначения $\tau_m |\vec{n}_m| = \tilde{\tau}_m$, $t_n |\vec{n}_n| = \tilde{t}_n$, $m = 1, \dots, n-1$.

Следовательно, методика циклического возбуждения и регистрации многоимпульсного фотонного эха, позволяющая определять его комбинаторные свойства, будет справедлива и для газовых резонансных сред. На рис. 1 представлена блок-схема демонстрации установления комбинаторных свойств сигналов ФЭ в условиях циклического многоимпульсного возбуждения.

В третьей главе для увеличения эффективности применения комбинаторных свойств фотонного эха при оптической дискретной обработке информации исследованы свойства ФЭ с точки зрения увеличения размерности обрабатываемой информации. Очевидно, размерность обрабатываемой информации в данном случае будет зависеть от числа импульсов в возбуждаемой последовательности n и допустимых дискретных значений временных интервалов между возбуждающими импульсами.

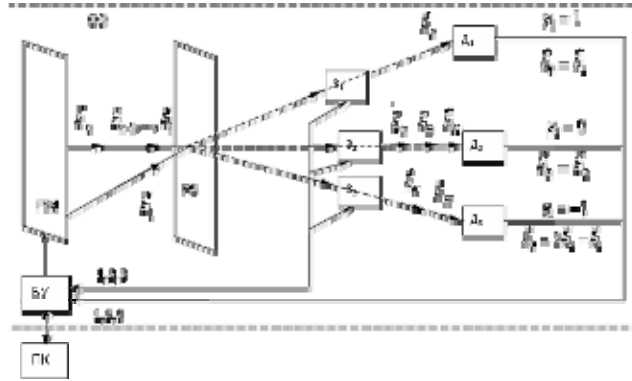


Рис. 1. Блок-схема для реализации методики циклического возбуждения и регистрации многоимпульсного фотонного эха: ГВИ – генератор возбуждающих импульсов; РС – резонансная среда; З₁, З₂, и З₃ – оптические затворы в трех пространственных каналах регистрации сигналов ФЭ; Д₁, Д₂, Д₃ – детекторы сигналов эха в трех выбранных направлениях; БУ – блок управления; ПК – персональный компьютер; $\vec{k}_л$, $\vec{k}_в$, $\vec{k}_с$ – волновые векторы сигналов первичного, восстановленного и стимулированного фотонного эха; $\vec{k}_1, \dots, \vec{k}_{n-1}$ – волновые векторы возбуждающих коротких импульсов; ОЭ – оптический эхо-процессор на фотонном эхе (внутри контура, обозначенного штриховыми линиями).

Поскольку для выполнения условия когерентности возбуждения эхо-сигналов необходимо, чтобы суммарное время возбуждения и регистрации эхо-сигналов было меньше времени необратимой поперечной релаксации T_2 выбранной среды, то число возбуждающих импульсов и максимально допустимое при этом значение временных интервалов между возбуждающими импульсами будут ограничены данным временем. В результате исследований предложено уплотнение информации при ее оптической обработке на основе комбинаторных свойств фотонного эха. При этом комбинаторные свойства циклически возбуждаемого многоимпульсного фотонного эха независимо проявляются при его одновременном возбуждении двумя дискретными оптическими сигналами, подаваемыми в одном луче по двум ортогональным направлениям линейной поляризации. Два направления линейной поляризации оптического излучения являлись поляризационными каналами оптической обработки информации. При этом необходимо разделить число возбуждающих импульсов пополам и реализовать одновременное возбуждение по двум ортогональным направлениям линейной поляризации оптического излучения получившимися последовательностями возбуждающих импульсов.

Тогда выражение для временного синхронизма (1) можно переписать следующим образом:

$$\sum_{m=0}^s \tau_m x_m = \sum_{m=s+1}^{n-1} \tau_m y_m, \quad (9)$$

где $\tau_0 = b$, $s = [n/2]$, $y_i = -x_i, i = s+1, \dots, n-1$ ($[a]$ есть целая часть числа a), $x_0 = -1$, $x_m \in \{-1, 0, 1\}, m = 1, 2, \dots, s$, $y_m \in \{-1, 0, 1\}, m = s+1, \dots, n-1$. Пусть первая половина возбуждающих импульсов имеет горизонтальное направление вектора поляризации – распространяются в канале *A* оптической обработки информации, а остальная часть возбуждающих импульсов – вертикальное и распространяется в канале *B*. Временные интервалы между возбуждающими импульсами будут принимать значения $\tau_0, \tau_1, \dots, \tau_s$ в *A*-канале и $\tau_{s+1}, \dots, \tau_{n-1}$ – в *B*-канале. Моменты излучения первых импульсов в поляризационных каналах *A* и *B* должны быть согласованы так, чтобы последние импульсы (импульс $(s+2)$ -й в канале *A* и импульс $(n-s)$ -й в *B*-канале) излучались одновременно в некоторый момент t^* . Полученное выражение (9) справедливо только в случае регистрации эхо-откликов по какому-либо из трех возможных направлений в обоих каналах во время:

$$T = t^* - \sum_{m=0}^s \tau_m x_m = t^* - \sum_{m=s+1}^{n-1} \tau_m y_m \geq t^*. \quad (10)$$

Иначе серия эхо-сигналов, возбуждаемая данной последовательностью импульсов, не обладает комбинаторными свойствами. При осуществлении независимой регистрации циклически возбуждаемых сигналов ФЭ различных поляризационных каналов, их комбинаторные свойства будут проявляться в каждом из таких каналов независимо. Направления векторов линейной поляризации этих двух каналов выбираются ортогональными для достижения оптимального различения эхо-сигналов, формирующихся в них. Тогда, согласно поляризационным свойствам для независимой регистрации сигналов первичного и восстановленного ФЭ, формирующихся в разных каналах, условие ортогональности векторов линейной поляризации этих двух каналов будет достаточным. Для стимулированного ФЭ данное условие не является достаточным, поскольку если хотя бы один из возбуждающих импульсов имеет отличный от других угол вектора поляризации, то сигнал СФЭ будет иметь угол вектора поляризации этого импульса. Очевидно, такие эхо-сигналы в случае их регистрации учитываться не должны. Для полного различения «истинных» и «ложных» сигналов СФЭ предложено использовать амплитудно-временную форму возбуждающих импульсов и как следствие – эхо-сигналов в качестве дополнительного признака выборки «истинных» эхо-сигналов при регистрации [27]. Тогда все возбуждающие

Рис. 2. Амплитудно-временная форма эхо-сигналов при различной амплитудно-временной форме возбуждающих импульсов с учетом поляризации, где стрелками показано направление вектора линейной поляризации возбуждающего импульса и эхо-сигнала.

Рис. 3. Принципиальная схема формирования выходных сигналов в двух ортогональных направлениях линейной поляризации оптического излучения с течением времени t , где \vec{E}_A и \vec{E}_B – амплитуды напряженностей поля, 1, 2, 3...12 – импульсы возбуждающей последовательности, ПФЭ, СФЭ, ВФЭ – сигналы первичного, стимулированного и восстановленного фотонного эха, соответственно.

$$\sum_{m=1}^{n-1} \tau_m x_m = c, \quad x_m \in \{0, 1, 2\}, \quad m = 1, 2, \dots, n-1 \quad (11)$$
$$\sum_{m=1}^{n-1} \tau_m \gamma_m = b, \gamma_m \in \{-1, 0, 1\}, b = c - \sum_{m=1}^{n-1} \tau_m, m = 1, 2, \dots, n-1. \quad (12)$$

Пусть известные параметры «задачи о рюкзаке» $\tau_1, \dots, \tau_{n-1}$ будут представлены по какому-либо правилу дискретными значениями временных интервалов между короткими лазерными импульсами, а параметр b - по тому же правилу временем регистрации эхо-сигналов в первом акте возбуждения $b = t_n - t$. Тогда, как следует из (1) и (12), с помощью методики циклического возбуждения и регистрации многоимпульсного фотонного эха с заданными параметрами возбуждения можно определить последовательность направлений распространения эхо-сигналов $\gamma_m \in \{-1, 0, 1\}$. При осуществлении замены переменной каждого члена данной последовательности получим последовательность $x_m \in \{0, 1, 2\}$, $m = 1, 2, \dots, n-1$, которая и будет являться одним из возможных решений «задачи о рюкзаке» (11). Следовательно, входными данными оптической дискретной обработки информации в эхо-процессоре, реализующем решении «задачи о рюкзаке», будут являться дискретные значения временных интервалов между короткими лазерными импульсами и времени регистрации эхо-сигнала в первом акте возбуждения, а выходными данными - члены одной из возможных последовательностей значений $\gamma_1, \dots, \gamma_{n-1}$, ($\gamma_m \in \{-1, 0, 1\}$, $m = 1, 2, \dots, n-1$) направлений регистрации эхо-сигналов. Поскольку для определения последовательности значений $\gamma_1, \dots, \gamma_{n-1}$ необходимо $(n-2)$ раза повторить акты возбуждения и регистрации эхо-сигналов, каждый из которых требует времени, пропорционального числу n , то общее время работы такого оптического эхо-процессора, без учета сопровождающих затрат на преобразование уравнения (12), пропорционально $O(n^2)$. Порядок данной величины заметно меньше значения $O(2^{n/2})$, измеряющего трудоемкость решения более простой бинарной «задачи о рюкзаке» с использованием гипотетического процессора из [32]. На рис. 5 представлена возможная блок-схема оптического эхо-процессора, осуществляющего дискретную оптическую обработку информации на основе комбинаторных свойств ФЭ, использующую два параллельных (поляризационных) канала.

Поскольку значения интенсивностей эхо-сигналов при многоимпульсном возбуждении будут сильно различаться, то возможность надежной регистрации всех эхо-сигналов будет зависеть от отношения максимальной регистрируемой интенсивности эхо-сигналов к минимальной, характерного для используемых регистрирующих устройств:

$$\eta_{II} = \frac{I_{\max}}{I_{\min}}. \quad (13)$$

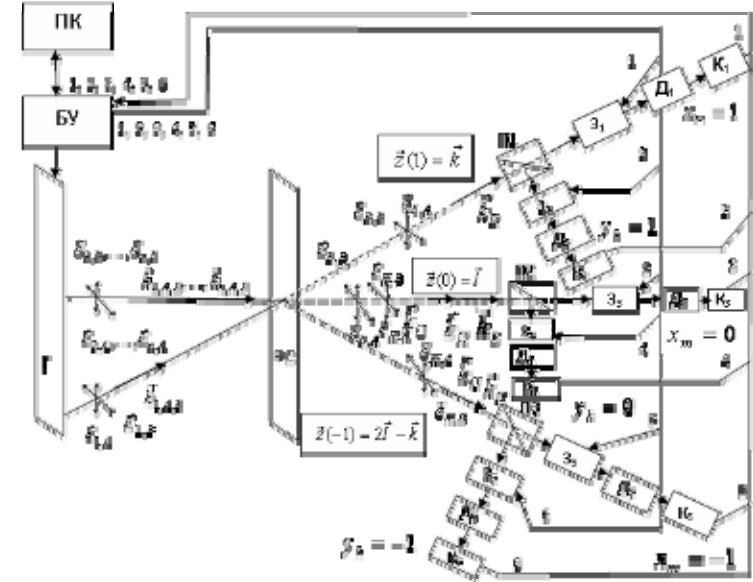


Рис. 5. Блок-схема функционального оптического эхо-процессора на основе комбинаторных свойств многоимпульсного ФЭ, использующего два параллельных канала для оптической дискретной обработки информации: Г – генератор возбуждающих импульсов; РС – резонансная среда; П1, П2, ПЗ – призмы Глана; З1 и З2, З3 и З4, З5 и З6 – оптические затворы; К1, ..., К6 – компараторы; Д1, ..., Д6 – детекторы эхо-сигналов; БУ – блок управления; ПК – персональный компьютер; $\vec{k}_1, \dots, \vec{k}_n$ – волновые векторы возбуждающих коротких импульсов; $\vec{k}_I, \vec{k}_B, \vec{k}_C$ – волновые векторы сигналов ПФЭ, ВФЭ и СФЭ; $\vec{e}_{m,A}$ – вектор поляризации m -го импульса или эхо-сигнала в канале А, $\vec{e}_{m,B}$ – вектор поляризации в канале В.

Считая, что все импульсы в возбуждающей последовательности имеют «площади» импульсов, при которых минимальные по интенсивности эхо-сигналы, имеют максимальные значения, после определения необходимых интенсивностей выражение (13) примет вид:

$$\eta_I = \frac{9}{4} \exp \left\{ \frac{4}{T_2} (2\tau_{\max} - T_2/2 + 3\Delta t) + \right. \\ \left. + \frac{8}{T_2^2} \left(2\tau_{\max}^2 + 2T_2\Delta t - (T_2/2)^2 + T_2\tau_{\max} - 2\Delta t\tau_{\max} \right) \right\}, \quad (14)$$

где T_2^* и T_2 – время поперечной обратимой и необратимой релаксации резонансной среды, $\tau_{\min} = T_2/2 - 3 \cdot \Delta t - \tau_{\max}$. Тогда получим следующее выражение для максимально допустимого значения временных интервалов

между возбуждающими импульсами (отброшены члены, содержащие множитель $(\Delta t)^2$, в виду их малости):

$$\tau_{\max} = \frac{-(1/T_2 + T_2/T_2^{*2} - 2\Delta t/T_2^{*2}) + \sqrt{D}}{32/T_2^{*2}}, \quad (15)$$

$$D = 1/T_2^2 + 1/T_2^{*2} \cdot \left[129 \cdot (T_2^2/T_2^{*2}) - 772 \cdot (\Delta t/T_2) - 2052 \cdot (T_2 \cdot \Delta t/T_2^{*2}) + 130 + 64 \cdot \ln(4/9 \cdot \eta_I) \right].$$

Тогда можно записать следующие выражения, ограничивающие допустимые значения для временных интервалов:

$$\begin{aligned} T_2/2 - 3 \cdot \Delta t - \tau_{\max} &\geq \tau_{\min} \square \Delta t, \\ \frac{-(1/T_2 + T_2/T_2^{*2} - 2\Delta t/T_2^{*2}) + \sqrt{D}}{32/T_2^{*2}} &\geq \tau_{\max} \square \tau_{\min}. \end{aligned} \quad (16)$$

В случае если полученное в соответствии с выражением (15) значение τ_{\max} будет больше времени релаксации T_2 , то τ_{\max} определяется только из условия когерентности возбуждения эхо-сигналов, накладываемого временем релаксации T_2 :

$$\tau_{\max} \cdot (n-1) + \Delta t \cdot n \leq T_2/2, \quad (17)$$

где n – число возбуждающих импульсов.

Поскольку для выполнения условий (1) и (2) временного и пространственного синхронизмов необходимо, чтобы $\tau_m \square \Delta t$, то возьмем за минимальный шаг изменения дискретного сигнала величину длительности короткого лазерного импульса Δt . Правило задания дискретных сигналов можно представить в виде:

$$\tau_m = \tau_{\min} + z_m \cdot \Delta t, \quad (18)$$

где z_m – число, которое необходимо представить в виде дискретного значения временного интервала, $\tau_m \leq \tau_{\max}$. Одним из достоинств предлагаемого метода оптической дискретной обработки информации является возможность задания правила представления известных параметров «задачи о рюкзаке» в дискретные значения временных интервалов между короткими лазерными импульсами для выполнения (12). В связи с этим, очевидно, можно представить в виде дискретного значения временного интервала между возбуждающими импульсами и нецелое число, а «задача о рюкзаке», имеющая нецелые известные параметры, является более трудоемкой для решения с помощью современных математических методов, или не решаемой за приемлемое время.

Поскольку существенным ограничением для регистрации всей совокупности эхо-откликов, возбуждаемых последовательностью из n коротких импульсов, является экспоненциально большое число этих откликов, оцениваемое величиной $O(3^n)$ [33], условие (17) не является достаточным для определения максимально допустимого значения n . В качестве критерия, характеризующего возможность регистрации отдельного эхо-отклика, рассмотрим аналогично [34] отношение интенсивности эхо-сигнала I_s к интенсивности некогерентного спонтанного шума всех эхо-откликов $I_{\text{нк}} \cdot 3^n$:

$$\frac{\delta_0}{3^n} = \frac{I_s}{I_{\text{нк}} \cdot 3^n} = \frac{1}{2 \cdot 3^n} N \left(\frac{T_2^*}{\Delta t} \right) \left(\frac{3\lambda^2}{8\pi\epsilon S} \right). \quad (19)$$

Здесь N – полное число частиц в ансамбле, T_2^* – время поперечной обратной релаксации, Δt – длительность возбуждающих импульсов, λ – длина волны излучаемого света, S – поперечное сечение возбуждающих лазерных пучков, ϵ – диэлектрическая проницаемость. Считая поддающимися регистрации эхо-отклики с отношением сигнал-шум, меньшим или равным величине δ – характеризующей возможности приемной аппаратуры, получим:

$$\frac{\delta_0}{3^n} \leq \delta. \quad (20)$$

Тогда допустимое количество импульсов, при котором будут регистрироваться все эхо-сигналы, можно определить:

$$3 \leq n \leq \log_3(\delta_0/\delta). \quad (21)$$

Из полученных выражений (21) и (19) видно, что допустимое число возбуждающих импульсов n возможно увеличить, повысив отношение эхо-отклика к некогерентному спонтанному шуму и увеличив чувствительность регистрирующей аппаратуры. Последние достижения техники оптического эксперимента позволяют получать оптические пучки диаметром порядка 1 мкм, также имеются перспективы получения значительно меньших значений диэлектрической проницаемости. Значительный прогресс достигнут и в области повышения чувствительности регистрирующей аппаратуры, поскольку регистрируются даже одиночные фотоны [35]. Использование в оптическом эхо-процессоре двух параллельных каналов для оптической одновременной обработки информации увеличивает размерность обрабатываемой информации вдвое.

Поскольку отличительной особенностью экспериментов, описанных в работе [22], является возможность наблюдения многоимпульсного ФЭ в парах молекулярного йода при комнатных температурах, для данных экспериментов определены допустимые значения временных интервалов, отделяющих возбуждающие импульсы, и количество импульсов в возбуждающей после-

довательности. Получены следующие значения при $T_2=1,4$ мкс: $\tau_{\max} = 680$ нс, $\tau_{\min} = 8$ нс, при $n=3$, и длительности возбуждающих импульсов $\Delta t = 4$ нс (17). Если считать минимальным шагом изменения дискретного значения временного интервала длительность возбуждающего импульса $\Delta t = 4$ нс, то получится, что при этом τ_m может принимать 170 дискретных значений (18). С увеличением числа возбуждающих импульсов n до 10 максимальное значение временного интервал уменьшится до $\tau_{\max} = 73$ нс при тех же значениях τ_{\min} и Δt . Тогда τ_m может принимать 18 дискретных значений. Поскольку в эхо-спектроскопии осуществлялась регистрация эхо-сигналов от большого числа возбуждающих импульсов [23], то, очевидно, возможно увеличение количества возбуждающих импульсов и значений временных интервалов между ними при постановке такой задачи. В этом случае для данного времени релаксации $T_2=1,4$ мкс можно получить $\tau_{\max} = 670,2$ нс, при $\tau_{\min} = 0,2$ нс и $n=100$, тогда τ_m может принимать дискретные значения с шагом 1 от 0 до 744.

В случае, когда регистрирующие эхо-сигналы устройства позволяют детектировать одиночные фотоны, число возбуждающих импульсов, а следовательно и размерность оптически обрабатываемой информации возможно значительно повысить. Новый предел минимально допустимых значений τ_{\min} и Δt , позволяющий увеличить размерности решаемой «задачи о рюкзаке» до практически значимых, можно получить, используя метод, разработанный авторами работ [20, 21]. С помощью данного метода можно определить q -бит квантовой информации резонансной среды, которая преобразуется из классической информации при ее оптической обработке.

Таким образом, имеются большие перспективы для увеличения размерности информации при оптической ее обработке на основе комбинаторных свойств фотонного эха.

В **Заключении** приведены основные результаты диссертационного исследования и выводы из полученных результатов.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Заданной последовательности произвольных временных интервалов, отделяющих импульсы возбуждающей последовательности, соответствует вполне определенная комбинация направлений распространения эхо-сигналов, выбираемых определенным образом в каждом акте возбуждения фотонного эха.

2. Предложен новый метод оптической обработки информации на основе возбуждения сигналов фотонного эха дискретным оптическим сигналом, представленным многоимпульсной последовательностью с произвольными дискретными значениями временных интервалов между импульсами.

3. Установлена возможность независимого проявления комбинаторных свойств многоимпульсного фотонного эха при его одновременном возбуждении двумя дискретными оптическими сигналами, подаваемыми в одном луче по двум ортогональным направлениям линейной поляризации.

4. За счет использования двух ортогональных направлений линейной поляризации оптического излучения, возбуждающего сигналы многоимпульсного фотонного эха, можно осуществить уплотнение информации при ее дискретной оптической обработке.

5. Эволюция резонансной среды при циклическом многоимпульсном возбуждении сигналов фотонного эха сопровождается физической реализацией решения троичной «задачи о рюкзаке», при этом надлежащая фиксация параметров регистрируемых сигналов ФЭ приводит к получению результатов ее вычислений.

6. Разработаны физические основы для построения функционального оптического процессора нового типа, использующего обработку дискретных оптических сигналов, позволяющего точно и быстро выполнять функцию решения одной из задач дискретной математики при ограничении размерности исходных данных.

7. Получены аналитические выражения, учитывающие граничные условия возбуждения многоимпульсного фотонного эха, позволяющие определить максимально допустимые временные интервалы между возбуждающими импульсами и оценивать максимальное число импульсов в возбуждающей последовательности, при которых возможна регистрация многоимпульсного фотонного эха.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

- [A1] **Нигматуллина (Сидорова) В.Т.** Фотонное эхо в парах йода - как метод моделирования кватернионных вычислений при варьировании импульсной площадью возбуждающих импульсов / Попов И.И., Лехин А.Н., Нигматуллина (Сидорова) В.Т. // X международная молодежная научная школа «Когерентная оптика и оптическая спектроскопия»: Сб. статей. - Казань, КГУ.-2006. -С.185-188.
- [A2] **Vera T. Nigmatullina** Photon echo as a method of optical processor construction for realization of computing operations above hypercomplex numbers / **Vera T. Nigmatullina**, Ivan I. Popov, Vadim A. Kozlov, and Anatolii N. Leukhin // Proc. SPIE.- 2008.- Vol. 7024, 70240L
- [A3] **Vera T. Nigmatullina** Multipulse excitation of photon echo and principles of parallel functioning of optical echo-processors / Ivan I. Popov, Mikhail Y. Kokurin, and Vera T. Nigmatullina // Proc. SPIE .- 2008.- V. 7024.- 70240K.

- [A4] **Нигматуллина В.Т.** Физическое моделирование вычислительных операций над гиперкомплексными числами и его роль в построении квантовой памяти на фотонном эхе / Попов И.И., Нигматуллина В.Т. // Изв. РАН, сер. физ.- 2008, Т. 72, - №5, - С. 767–770.
- [A5] **Нигматуллина В.Т.** Вычислительные режимы работы гиперкомплексного оптического эхо-процессора и контроль в нем давления резонансного газа / Нигматуллина В.Т., Попов И.И., Попова Г.Л. // Материалы Второй международной научной школы «Наука и инновации – 2007» ISS «SI-2007» / Под ред. И.И. Попова, В.А. Козлова, А.П. Сухокурова, В.В. Самарцева, В.Г. Зинова, В.Г. Яшина. – Йошкар-Ола, МарГУ.-2007. – С. 68-76.
- [A6] **Нигматуллина В.Т.** Моделирование режимов формирования многоимпульсного фотонного эха и его применение для решения бинарной задачи о рюкзаке / Кокурин М.Ю., Попов И.И., Нигматуллина В.Т., Попова Г.Л. // Материалы Третьей международной научной школы «Наука и инновации – 2008» ISS «SI-2008» / Под ред. И.И. Попова и др. – Йошкар-Ола, МарГУ.-2008. – С. 79-82.
- [A7] **Сидорова В.Т.** Метод циклического многоимпульсного режима возбуждения сигналов фотонного эха и его применение / Сидорова В.Т., Попов И.И., Кокурин М.Ю., Орлов А.И. // Ученые записки КГУ. Сер. физико-математические науки. – Казань, КГУ. – 2009. – Т. 151. – кн. 1. – С. 172-180.
- [A8] **Нигматуллина В.Т.** Многоимпульсное возбуждение фотонного эха и его применение для разработки принципа построения оптического эхо-процессора / Попов И.И., Кокурин М.Ю., Нигматуллина В.Т. // Изв. РАН, сер. физ.-2008. - Т.72.- №1.- С. 58-60.
- [A9] **Nigmatullina V.T.** Modeling of the multipulse photon echo and its application in specialized optical computers / V.T. Nigmatullina, M.Yu. Kokurin and I.I. Popov // Physics of Wave Phenomena. - 2009. – Vol. 17, №1. – С. 15-20.
- [A10] **Нигматуллина В. Т.** Поляризационные свойства многоимпульсного фотонного эха и их применение при разработке оптического процессора для решения специальных математических задач / Нигматуллина В. Т., Попов И. И., Кокурин М. Ю. // Когерентная оптика и оптическая спектроскопия. Сб. тр. – Казань, 2007. – С. 207 – 211.
- [A11] **Нигматуллина В. Т.** Амплитудно-временные и поляризационные свойства фотонного эха и их практическая значимость / Газизов К.Ш., Попов И.И., Нигматуллина В. Т., Попова Г.Л. // Материалы Второй международной научной школы «Наука и инновации – 2007» ISS «SI-2007» / Под ред. И.И. Попова и др. – Йошкар-Ола: МарГУ.-2007. – С. 58-68.

- [A12] **Нигматуллина В. Т.** Математическое моделирование оптической обработки информации при решении «задачи о рюкзаке» / Нигматуллина В. Т., Кокурин М. Ю., Орлов А.И., Попов И. И. // Когерентная оптика и оптическая спектроскопия. Сб. тр. – Казань, 2008. – С. 266 – 270.
- [A13] **Нигматуллина В.Т.** Многоимпульсное фотонное эхо и микропрограммные оптические вычисления / Нигматуллина В.Т., Попов И.И., Кокурин М.Ю. // Труды Научной сессии МИФИ-2009, Фундаментальные проблемы науки. – М.: МИФИ. – 2009. – Т.4. – С. 117-120.
- [A14] **Сидорова В.Т.** Циклическое возбуждение сигналов многоимпульсного фотонного эха и исследование возможности оптической обработки информации на его основе / Сидорова В.Т. // Материалы Пятой международной научной школы «Наука и инновации – 2010» ISS «SI-2010»: Материалы Пятого международного семинара «Фундаментальные системы и инновации» и Всероссийского молодежного научного семинара «Наука и инновации – 2010» / Под ред. И.И. Попова и др. – Йошкар-Ола: МарГУ.- 2010. – С. 208-222.

СПИСОК ЦИТИРОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Елютин С.О. Об особенностях формы сигналов светового (фотонного) эха / Елютин С.О., Захаров С.М., Маныкин Э.А. // Опт.спектр. – 1977. – Т.42. - №5. – С. 1005-1007.
2. Зуйков В.А. Корреляция формы сигналов светового эха с формой возбуждающих импульсов / Зуйков В.А., Самарцев В.В., Усманов Р.Г. // Письма в ЖЭТФ.- 1980.- Т. 32.- №4.- С. 293-297.
3. Carlson N.W. Storage and time reversal of light pulses using photon echoes / Carlson N.W., Rothberg L.T., Yodh A.G., Babbitt W.R., Mossberg T.W.// Opt. Lett. – 1983. – V.8. – N9. – P. 483-485.
4. Василенко Л.С. Форма сигналов фотонного эха в газе / Василенко Л.С., Рубцова Н.Н. // Оптика и спектроскопия.- 1985.- Т.59.- №1.- С. 52-56.
5. Штырков Е.И. Резонансная динамическая голография и оптическое сверхизлучение / Штырков Е.И., Самарцев В.В. // Электромагнитное сверхизлучение.-Казань: КФ АН СССР.- 1975.-С. 398-426.
6. Carlson N.W. Storage and phase conjugation of light pulses using stimulated photon echoes / Carlson N.W., Babbitt W.R., Mossberg T.W.// Opt. Lett. – 1983. – V.8. – № 12. – P.623-625.
7. Нефедьев Л.А. Динамическая эхо-голография в вырожденных и многоуровневых системах // Изв. АН СССР, сер. физ.- 1986.- Т.50.- №8.- С. 1551-1558.
8. Rebane A.K. // Optics Commun. – 1988. – V.65. – P. 175.
9. Shen X.A., Nguyen A., Perry J.W., Huestis D.L., Kachru R. // Science - 1997. – V. 278. – P. 96.

10. Mitsunaga M. Time- and frequency-domain hybrid optical memory: 1.6-kbit data storage in $\text{Eu}^{3+}:\text{Y}_2\text{SiO}_5$ / Mitsunaga M., Yano R., Uesugi N. // *Opt. Lett.*-1991.- V.16.- P. 1890.
11. Lin H, Wang T, Mossberg T.W. // *Opt. Lett.* – 1995. – V. 20. – P. 91.
12. Popov I.I. Observation of the Photon Echoes Shape Looking Effect a Molecular gas / Bikbov I.S., Yevseyev I.V., Popov I.I., Reshetov V.A., Samartsev V.V. // *Laser Phys.* - 1991. -V. 1.-№1. -P. 126-127.
13. Kroll S. Photon-echo-based logical processing/ Kroll S., Elman U. // *Opt. Lett.*-1993.- V. 18.- P. 1834.
14. Zuikov V.A. Space-Time Properties of Multichannel Reversed Long-Lived Photon Echo / Zuikov V.A., Samartsev V.V. // *Laser Physics.*- 1991.- V.1.- P. 542.
15. Xu E.Y. Nanosecond image processing using stimulated photon echoes / Xu E.Y., Kroll S., Huestis D. et.al. // *Opt. Lett.*-1990.- V. 15.- P. 562.
16. Ахмедиев Н.Н. Обращенное долгоживущее световое эхо в кристалле $\text{LaF}_3 : \text{Pr}^{3+}$ / Ахмедиев Н.Н., Борисов Б.С., Зуйков В.А., Самарцев В.В. и др. // *Письма в ЖЭТФ.*- 1987.- Т.45.-№3.- С. 122-125.
17. Зуйков В.А. Возбуждение сигналов светового (фотонного) эха последовательности бегущих и стоячих волн / Зуйков В.А., Самарцев В.В., Турьянский Е.А. // *ЖЭТФ.* – 1981. – Т.81. - №2. – С. 653-663.
18. Зуйков В.А. Аккумулированное долгоживущее световое эхо и оптическая память./ Зуйков В.А., Гайнуллин Д.Ф., Самарцев В.В., Стельмах М.Ф. и др. // *Квантовая электроника.*- 1991.- Т.18.- С. 525.
19. Ахмедиев Н.Н. Обнаружение многократного долгоживущего светового эха / Ахмедиев Н.Н., Борисов Б.С., Зуйков В.А. и др. // *Письма в ЖЭТФ.*- 1988.- Т.48.- №11.- С. 585-587.
20. Нефедьев Л.А. Информационные процессы в оптической эхо-голографии / Нефедьев Л.А., Русанова И.А. // *Оптика и спектроскопия.* – 2001. – Т. 90, №6. - С. 1000-1004.
21. Nefed'ev L.A. Copying quantum information in a three-level medium with a phase memory / Nefed'ev L.A. and Rusanova I.A. // *Laser physics.* - 2002. – V.12. - № 3. - P. 1–5.
22. Попов И.И. Световое эхо в парах молекулярного йода и его применение // Кандидатская дис. на соискание кандидата физ.-матем. наук. – Казань. – 1990.
23. Nakatsuka H. Multiple photon echoes in molecular iodine / Nakatsuka H. et. al. // *Optics Communications* – 1983. – V.47. – №1. – P. 65-69.
24. Попов И.И. Физические принципы построения оптического эхо-процессора для выполнения операций с кватернионами / Попов И.И., Леухин А.Н. // *Изв.РАН, сер.физ.* -2004.- Т.68.-№9.- С. 1305-1307.
25. М. Гэри, Д. Джонсон Вычислительные машины и труднорешаемые задачи. М.: Мир, 1982. – 416 с.
26. Lin H, Wang T, Mossberg T.W. // *Opt. Lett.* – 1995. – V. 20. – P. 1658.

27. Бикбов И.С., Зуйков В.А., Попов И.И., Попова Г.Л., Самарцев В.В. Ассоциативные свойства многоканального фотонного эха и оптическая память // *Квантовая электроника.* -1995. - Т.22. - №10. - С. 1057 - 1060.
28. Бикбов И.С., Евсеев И.В., Попов И.И., Решетов В.А., Самарцев В.В. Эффект запираания сигнала стимулированного фотонного эха // *Журнал прикладной спектроскопии.* - 1991. – Т. 55. - №1. – С. 87.
29. Калачев А.А. Когерентные явления в оптике / Калачев А.А., Самарцев В.В. // Казань: Казанский государственный университет им. В.И. Ульянова.- 2003.-281 с.
30. Яшин А.Н. // *ЖПС.* – 1985. – Т. 17. – С. 309.
31. Mossberg T., Flusberg A., Kachru R., and Hartmann S.R. Tri-level echoes // *Phys. Rev. Lett.* 1977. – V. 39. - №24. – P. 1533 – 1526.
32. D. Grigoriev, A. Kazakov, S. Vakulenko // *Письма в ЭЧАЯ.* – 2007. – Т. 4. - №2. С. 244.
33. Ершов Г.И. // в кн. *Электромагнитное сверхизлучение.* Казань: Татполиграф. – 1975. С. 63-99.
34. Маныкин Э.А. Оптическая эхо-спектроскопия / Маныкин Э.А., Самарцев В.В.// М.: Наука.- 1984. – 270 с.
35. А.В. Шкаликов, А.А. Калинин, Д.А. Калашников, А.А. Калачев, В.В. Самарцев Спектроскопия в режиме счета фотонов Конференция «Концепции симметрии и фундаментальных полей в квантовой физике XXI века» / Самара, СамГУ. – 2005. – С. 101-102.